Energy, Mines and Resources Canada

Nº 85-8F

RAPPORT DE CANMET

NOUVELLE MÉTHODE DE DÉCONVOLUTION POUR L'ANALYSE DES SPECTRES DE DISTRIBUTION DE LA DENSITÉ DE PROBABILITÉ OBTENUS LORS DE MESURES D'INTERROGATION AUX RAYONS GAMMA D'ÉCOULEMENTS MULTIPHASES

D.D.S. LIU

Canada

86-03500/

NOUVELLE MÉTHODE DE DÉCONVOLUTION POUR L'ANALYSE DES SPECTRES DE DISTRIBUTION DE LA DENSITÉ DE PROBABILITÉ OBTENUS LORS DE MESURES D'INTERROGATION AUX RAYONS GAMMA D'ÉCOULEMENTS MULTIPHASES

D.D.S. Liu

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE
LABORATOIRES DE RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE

RAPPORT DE CANMET 85-8F

36pp

NOVEMBRE 1984

MICROMEDIA

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

En vente au Canada par l'entremise de nos

agents libraires agréés
et autres librairies

ou par la poste auprès du:

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/85-8F
ISBN 0-660-91734-3

au Canada: $4.25
à l'étranger: $5.15

Prix sujet à changement sans préavis

MICROMEDIA

Nouvelle méthode de déconvolution pour l'analyse des spectres de distribution de la densité de probabilité obtenus lors de mesures d'interrogation aux rayons gamma d'écoulements multiphases

*D.D.S. Liu**

Résumé

Une méthode numérique de déconvolution des spectres de distribution de la densité de probabilité (SDDP) a été élaborée. Elle est basée sur les principes des moindres carrés et sur l'algorithme d'itération de Newton-Raphson. Les SDDP ont été obtenus lors de mesures d'écoulements multiphases basées sur une technique d'interrogation aux rayons gamma récemment mise au point au Laboratoire de recherche sur les combustibles synthétiques des Laboratoires de recherche sur l'énergie (CANMET), en collaboration avec les laboratoires nucléaires de Chalk River d'Énergie atomique du Canada limitée. La déconvolution des SDDP fournit des renseignements sur les paramètres hydrodynamiques des phénomènes d'écoulement multiphase.

Un programme Fortran contenant les équations fondamentales utilisées dans la méthode numérique a été écrit en vue d'applications pratiques. Des exemples de déconvolution de SDDP simulés et observés sont donnés.

*Chercheur, Laboratoire de recherche sur les combustibles synthétiques, Laboratoires de recherche sur l'énergie, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, K1A OG1.

A New Deconvolution Method for Analysis of Probability Density Distribution Spectra Observed in Gamma-Ray Interrogation Measurements of Multi-Phase Flows

*D.D.S. Liu**

Abstract

A numerical method for the deconvolution of probability density distribution spectra (PDDS) has been developed. It is based on principles of the least square and the Newton-Raphson iteration algorithm. The PDDS were obtained from measurements of multi-phase flows using a gamma-ray interrogation technique developed recently in the Synthetic Fuels Research Laboratory of the Energy Research Laboratories, CANMET in collaboration with the Chalk River Nuclear Laboratories, Atomic Energy of Canada Limited. The deconvoluted PDDS contain information on the hydrodynamic parameters of multi-phase flow phenomena.

Fundamental equations for the numerical method were translated into a Fortran program for practical applications. Examples of PDDS deconvolutions for both simulated and observed spectra are given.

*Research Scientist, Synthetic Fuels Research Laboratory, Energy Research Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, K1A OG1.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé i
Abstract iii

Introduction 1
Théorie 2
  Convolution et déconvolution 2
  Problème 2
  Description théorique 3
  Méthode d'itération 4
  Autres applications 5
Exemples numériques 6
  Estimation initiale des pics de convultion 6
  Déconvolution de spectres DDP simulés 6
  Déconvolution de spectres DDP observés 7
Discussion 8
Remerciements 8
Références 9

TABLEAUX

1. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 1 13
2. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 1 25
3. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 2 26
4. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 3 27
5. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 4 28
6. Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 5 28

FIGURES

1. Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-946. Température = 200°C, pression = 2,76 MPa, vitesse superficielle du gaz = 0,00 cm/s 31
2. Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-615. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 1,77 cm/s 31
3. Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-657. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 1,31 cm/s 32
4. Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-990. Température = 200°C, pression = 2,76 MPa, vitesse superficielle du gaz = 2,38 cm/s 32
5. Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-681. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 0,53 cm/s 33

INTRODUCTION

Les colonnes à bulles sont largement utilisées comme absorbeurs, réacteurs catalytiques pour bouillies et bioréacteurs (1-5). Bien qu'elles soient faciles d'emploi, les colonnes à bulles sont difficiles à concevoir car leurs caractéristiques d'écoulement multiphase sont complexes. Les études hydrodynamiques des écoulements multiphases à basse température et sous faible pression avec les instruments décrits dans la documentation (6-9) ne posent pas de problèmes. Par contre, des difficultés surgissent à des températures et pressions élevées car les instruments ne peuvent être convenablement immergés dans l'écoulement. Il est alors nécessaire d'utiliser des signaux capables de traverser les parois épaisses du réacteur.

La méthode d'interrogation aux rayons gamma mise au point par le CANMET, en collaboration avec les Laboratoires nucléaires de Chalk River d'Énergie atomique du Canada limitée, constitue une excellente solution (10). Elle ne nécessite l'insertion d'aucune sonde.

Le principe de la technique d'interrogation aux rayons gamma d'écoulements multiphases et les méthodes statistiques d'analyse des données ont déjà été décrits (10). On sait ainsi que le spectre de distribution de la densité de probabilité (SDDP) peut fournir des renseignements sur les retenues liquides moyennées en fonction du temps, l'homogénéité des champs d'écoulement, les distributions des tailles des bulles, les régimes d'écoulement, etc.

En raison de la nature aléatoire de l'émission des photons par un radioisotope, le signal détecté fluctue de façon aléatoire autour d'une valeur moyenne. Dans un champ d'écoulement homogène, le SDDP observé serait une distribution de Poisson à écart type naturel (fig. 1). Dans ce cas, le taux de comptage moyen est directement lié à la longueur moyenne du trajet des rayons gamma traversant le matériau mesuré.

Cependant, dans la plupart des mesures d'écoulements multiphases effectuées dans le présent travail, le SDDP est extrêmement asymétrique (fig. 2 à 4). Pour déterminer le comportement hydrodynamique (11), il ne faut pas seulement tenir compte du taux moyen de comptage, mais il faut aussi examiner la forme du spectre DDP, avec ses principaux pics et coudes.

Pour obtenir des données détaillées, on a élaboré un modèle statistique (11), basé sur la déconvolution du spectre DDP. Le présent rapport décrit une méthode numérique de déconvolution des SDDP permettant d'analyser le comportement hydrodynamique des écoulements multiphases à l'aide du modèle.

THÉORIE

Convolution et déconvolution

Considérons la mesure d'une grandeur T(x) à l'aide d'un système linéaire caractérisé par une fonction réponse R(x,u). La relation entre le signal mesuré, M(u), et le signal vrai, T(x), peut s'écrire:

$$M(u) = \int_{o}^{\infty} R(x,u) * T(x) * dx + N(u) \qquad \text{Éq. 1}$$

où:

- N(u) = bruit de fond aléatoire inhérent au système mesuré
- u = variable transformée à partir de x par la convolution
- x = variable du signal vrai

Lorsque les sytèmes présentent une invariance translationnelle, la fonction réponse s'écrit R(x − u) et l'équation 1 devient:

$$M(u) = \int_{o}^{\infty} R(x - u) * T(x) * dx + N(u) \qquad \text{Éq. 2}$$

Les équations 1 et 2 sont couramment appelées *intégrales de convolution* (12).

Pour des spectres discrets tel le spectre d'interrogation aux rayons gamma étudié ici, le bruit de fond aléatoire N(u) peut être réduit à une valeur beaucoup plus faible que l'intégrale. Par conséquent, on n'introduit probablement pas d'erreur importante en négligeant N(u) dans les équations 1 et 2.

Bien entendu, le but de l'analyse des données est d'obtenir le signal vrai, T(x), à partir des nombres mesurés de M(u). Les méthodes de résolution de l'équation 2 sont appelées *déconvolutions* (13).

Problème

Un spectre DDP est un graphique du nombre d'évènements en fonction du taux de comptage (coups/temps d'échantillonnage). Des exemples sont donnés aux figures 1 à 5. Le spectre DDP d'un système non perturbé, tel le spectre mesuré dans un champ d'écoulement homogène, a une distribution de Poisson qui équivaut à une distribution gaussienne lorsque le taux de comptage est élevé:

$$Y(N) = H * \exp[-(N - C)^2 / (2 * \sigma^2)] \qquad \text{Éq. 3}$$

où:

- C = taux de comptage au centre du pic
- H = hauteur du pic
- N = taux de comptage (ou numéro de canal)
- σ = écart type
- Y(N) = hauteur correspondant au taux de comptage N

Dans le cas d'un écoulement multiphase, le spectre DDP mesuré est, en principe, la convolution d'un grand nombre de spectres de Poisson dans lesquels les hauteurs des pics et les positions des centres peuvent être différentes. Cela est dû au fait que dans un ensemble donné de conditions, les tailles et les formes des bulles sont différentes. Chaque sous-pic gaussien représente la fraction de temps (par rapport à la somme de tous les pics) pendant laquelle un phénomène hydrodynamique donné, par exemple une retenue liquide localisée, est observé. Cela est caractéristique des colonnes à bulles dans lesquelles les phénomènes hydrodynamiques varient en fonction du temps. Le spectre DDP complet peut être représenté par l'équation suivante:

$$Y(N) = \sum_{i=1}^{m} \{H_i * \exp[-(N - C_i)^2 / (2 * \sigma_i^2)]\} \qquad \text{Éq. 4}$$

où:

- C_i = taux de comptage au centre du i^e pic
- m = nombre de sous-pics gaussiens dans la convolution du spectre, l'indice i représentant le i^e sous-pic.

L'équation 4 est similaire à une équation décrivant un enregistrement numérique d'un spectre nucléaire ordinaire (14) sauf que dans ce dernier, on place l'énergie ou la fréquence caractérisée par le matériau en abscisse et la densité des photons en ordonnée.

Le problème consiste à trouver un nombre optimal de pics, m, qui soit égal au nombre réel de pics (M) ainsi que des valeurs de H_i et C_i avec i = 1 à m, telles que les valeurs de Y(N) pour N = 0 à ∞ calculées à partir de l'équation 2 représentent le mieux possible les valeurs de Y(N) mesurées. Tous ces paramètres sont des variables indépendantes.

Si on compare l'équation 4 et l'équation 2 généralisée, on note les équivalences suivantes entre les opérateurs et les paramètres des deux équations:

$x <=====> N$

$u <=====> C_i$

$M(x) <=====> Y(N)$

$T(u) <=====> H(C_i)$

$R(x,u) <=====> \exp[-(N - C_i)^2/(2 * \sigma_i^2)]$

$du <=====> 1$

$\infty <=====> \sum_i (\delta(C_i)) *$

où:

$<=====>$ = correspond à

$\delta(C_i)$ = une fonction d'échantillonnage unitaire

Ces équivalences montrent que l'équation 4 peut être écrite sous la forme généralisée de l'équation 2. Nous avons donc un problème de déconvolution typique.

Description théorique

La technique de lissage par les moindres carrés est l'une des meilleures méthodes de calcul des paramètres lorsque les résultats expérimentaux présentent des écarts. C'est celle que nous utilisons ici (15). Soit un ensemble de valeurs $[H_i^F, C_i^F(N)]$, avec $i = 1$ à M, qui représentent les paramètres finaux après calcul des moindres carrés, où F indique les valeurs lissées finales. De même, 0 et C indiquent les valeurs observées et calculées dans les itérations.

D'après le principe des moindres carrés (15), le problème consiste à calculer $[H_i^F, C_i^F(N_i)]$ de telle sorte que:

$$S = \sum_{N=0}^{\infty} [Y^O(N) - Y^F(N)]^2 = \text{minimum} \qquad \text{Éq. 5}$$

On a utilisé la méthode d'itération de Newton-Raphson pour résoudre l'équation 5 (15-17). Cette méthode est basée sur la linéarisation d'équations non linéaires (par exemple l'équation 2 ou 3) à l'aide de la série de Taylor. Cette méthode spécifique requiert des valeurs initiales des paramètres pour l'itération. Une fois des valeurs initiales raisonnables estimées, les paramètres "calculés" sont toujours reproduits, à n'importe quelle étape de l'itération. Pendant les itérations, on suppose que les paramètres sont $[H_i^C, C_i^C]$ où $i = 1$ à m et où $m > M$.

La série de Taylor donne:

$$Y^F(N) = Y^C(N) + \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta H_i) * \Delta H_i + \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta C_i) * \Delta C_i + O(\Delta H_i^2, \Delta C_i^2) \qquad \text{Éq. 6}$$

où:

$$\Delta C_i = C_i^F - C_i^C \qquad \text{Éq. 7}$$

$$\Delta H_i = H_i^F - H_i^C \qquad \text{Éq. 8}$$

O(X) = somme de tous les termes d'ordre égal ou supérieur à 2.

En substituant l'équation 6 dans l'équation 5 et en négligeant les termes d'ordre supérieur, il vient:

$$S = \sum_{N=0}^{\infty} [Y^O(N) - Y^C(N) - \sum_{i=1}^{m} \{\partial Y^C(N) / \partial \Delta H_i\} * \Delta H_i - \sum_{i=1}^{m} \{\partial Y^C(N) / \partial \Delta C_i\} * \Delta C_i]^2 = \text{minimum} \qquad \text{Éq. 9}$$

Cette équation est valide seulement lorsque ΔH_i et ΔC_i sont petits. Sinon, il faut effectuer des corrections d'ordre supérieur.

Les conditions pour l'équation 9 sont les suivantes:

$$\partial S / \partial H_j = 0 \text{ où } j = 1 \text{ à } m \qquad \text{Éq. 10}$$

et

$$\partial S / \partial C_j = 0 \text{ où } j = 1 \text{ à } m \qquad \text{Éq. 11}$$

D'après les équations 9 à 11:

$$\partial S / \partial H_j \sim 2 * \sum_{N=0}^{\infty} \{[OMC(N) - \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta H_i) * \Delta H_i - \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta C_i) * \Delta C_i] * [\partial Y^C(N) / \partial \Delta H_j]\} = 0 \qquad \text{Éq. 12}$$

$$\partial S / \partial \Delta C_j \sim 2 * \sum_{N=0}^{\infty} \{[OMC(N) - \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta H_i^C) * \Delta H_i - \sum_{i=1}^{m} (\partial Y^C(N) / \partial \Delta C_i) * \Delta C_i] * [\partial Y^C(N) / \partial \Delta C_j]\} = 0 \qquad \text{Éq. 13}$$

où:

$$OMC(N) = Y^{O}(N) - Y^{C}(N) \qquad \text{Éq. 14}$$

On notera que H_i^F et C_i^F sont des constantes pour i = 1 à M et que H_i^F disparaît pour i = M + 1 à m.

Étant donné que C_i^F et H_i^F sont des constantes, d'après les équations 7 et 8, nous avons les relations suivantes:

$$\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta H_i = - \partial Y^{C}(N) / \partial H_i^{C} \qquad \text{Éq. 15}$$

$$\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta C_i = - \partial Y^{C}(N) / \partial C_i^{C} \qquad \text{Éq. 16}$$

Substituons les équations 15 et 16 dans les équations 12 et 13, il vient:

$$\sum_{N=0}^{\infty} \{A(N) * [\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta H_j]\} = 0 \text{ pour } j = 1 \text{ à } m \qquad \text{Éq. 17}$$

$$\sum_{N=0}^{\infty} \{A(N) * [\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta C_j]\} = 0 \text{ pour } j = 1 \text{ à } m \qquad \text{Éq. 18}$$

où:

$$A(N) = [OMC(N) + \sum_{i=1}^{m} \{\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta H_i^{C} + * \Delta H_i + \sum_{i=1}^{m} \{\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta C_i^{C}\} * \Delta C_i\}] \qquad \text{Éq. 19}$$

et, d'après les équations 3, 15 et 16:

$$\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta H_i^{C} = \exp[-(N - C_i^{C})^2 / (2 * \sigma_i^2)] \qquad \text{Éq. 20}$$

$$\partial Y^{C}(N) / \partial \Delta C_i^{C} = [(N - C_i^{C}) * H_i / \sigma_i^2] * \exp[-(N - C_i^{C})^2 / (2 * \sigma_i^2)] \qquad \text{Éq. 21}$$

Les équations 17 et 18 fournissent 2 m équations linéaires pour 2 m inconnues, (ΔH_j, ΔC_j) avec j = 1 à m. Bien que m > M, l'itération (voir ci-dessous) éliminera les m − M pics supplémentaires supposés au début de l'itération.

Méthode d'itération

Pour résoudre le problème, on peut utiliser la méthode suivante basée sur la théorie présentée à la section précédente:

1. On détermine un ensemble de valeurs estimées de (H_i^C, C_i^C) pour i = 1 à m avec m > M, où M est encore inconnu. (Cependant, la méthode décrite plus loin permet de choisir facilement m).
2. On calcule les σ_i pour i = 1 à m suivant l'étalonnage résultant des expériences ou de la théorie décrite précédemment (18).
3. On calcule des valeurs de $Y^C(N)$ à partir de l'équation 4, pour la gamme des valeurs de N observées. Ces valeurs permettent de calculer le terme OMC(N) défini dans l'équation 14.
4. On établit 2 m équations linéaires à partir des équations 17 et 18, en se servant des équations 19 à 21.
5. On résout les 2 m équations linéaires pour obtenir les variables (ΔH_i, ΔC_i) pour i = 1 à m.
6. On calcule les nouveaux paramètres (H_i^C, C_i^C) pour i = 1 à m à partir des équations suivantes analogues aux équations 7 et 8:

$$H_i = H_i^{C} + \Delta H_i^{C} \qquad \text{Éq. 22}$$

$$C_i = C_i^{C} + \Delta C_i^{C} \qquad \text{Éq. 23}$$

où i = 1 à m.

Ces valeurs se rapprocheront plus des valeurs lissées finales si les effets d'ordre supérieur sont beaucoup plus faibles que les effets de premier ordre décrits dans l'équation 6.

7. On attribue de nouvelles valeurs aux paramètres pour l'itération suivante:

$$H_i^{C} = H_i \qquad \text{Éq. 24}$$

$$C_i^{C} = C_i \qquad \text{Éq. 25}$$

pour i = 1 à m.

8. Lorsque certaines des valeurs de H_i^C deviennent très faibles, ce qui indique qu'il s'agit de paramètres supplémentaires supposés au départ, elles sont négligées.

9. On calcule l'écart type du lissage avec les nouveaux paramètres. Si l'écart converge lorsqu'on compare avec les résultats de l'itération précédente, on peut arrêter le calcul.

10. On reprend à l'étape 2 pour la prochaine itération.

Autres applications

La méthode de déconvolution peut être utilisée pour pratiquement n'importe quel type de spectroscopie fournissant des spectres quantifiés discrets. Dans la déconvolution de spectres ordinaires, par exemple les spectres Mössbauer, les fréquences des centres des pics sont fixes. Par conséquent, on peut utiliser au départ des nombres connus de C_i où $i = 1$ à m ($m > M$). Le problème se réduit alors à un seul ensemble de m équations linéaires résultant de l'équation 17. Il est beaucoup plus simple que le cas considéré ici.

Il faut noter que dans des applications particulières, on doit utiliser la fonction réponse appropriée, par exemple la fonction de la fente en spectroscopie optique ou la fonction du noyau en spectroscopie nucléaire, équivalente à celle de l'équation 1 dans le cas présent.

EXEMPLES NUMÉRIQUES

Un programme basé sur les méthodes décrites ci-dessus a été écrit en Fortran-77 pour un ordinateur Cromemco System One. On l'a essayé pour la déconvolution de spectres simulés par des paramètres donnés et de spectres observés lors de mesures d'écoulement biphase par la technique d'interrogation aux rayons gamma (10,11). Quelques exemples sont donnés ci-dessous.

Pour l'interrogation aux rayons gamma, on a utilisé un analyseur multicanal couplé à un compteur capable de supprimer des signaux. Le taux de comptage N est linéairement proportionnel au numéro de canal. Par conséquent, les exemples de spectres de distribution de la densité de probabilité seront exprimés en nombres d'évènements en fonction du numéro de canal. Étant donné qu'on utilise un système à taux de comptage élevé, le spectre DDP pour un système non perturbé représente presque une distribution gaussienne parfaite qu'on suppose pour la fonction réponse. L'instrument a été étalonné à l'aide d'un générateur d'impulsions. On a observé que le signal vrai est une fonction d'échantillonnage unitaire, c'est-à-dire que chaque fréquence est représentée par un seul canal. L'écart type des pics gaussiens est donné par (11):

$$\sigma_i = 19{,}3 + 0{,}00743 * (C_i - 172) \qquad \text{Éq. 26}$$

On s'est servi de cette relation pour les spectres simulés et pour les spectres observés.

Estimation initiale des pics de convolution

Un spectre DDP convoluté est d'une largeur au demi-maximum (LDM) toujours supérieure ou égale à la LDM du spectre DDP non perturbé au même pic. En outre, le numéro de canal correspondant au maximum du pic est toujours proche d'un pic dans le spectre convoluté. En se basant sur ce fait, on peut assigner la valeur de $C_1{}^C$ à la position du maximum du pic.

En utilisant la hauteur du pic au maximum, $C_i{}^C$, puis σ_1 de l'équation 26, on a calculé un pic gaussien théorique basé sur l'équation 1. En soustrayant le pic gaussien calculé du SDDP original, on a obtenu le premier spectre DDP différentiel. Cette méthode est appelée *dépouillement du spectre*. Ensuite, on a poursuivi le dépouillement du spectre en considérant indépendamment ce premier spectre DDP différentiel afin d'obtenir la position centrale du pic suivant par la même technique. On a continué ainsi jusqu'à ce que le spectre différentiel devienne très petit. On a donc estimé m positions centrales pour l'itération initiale.

Après le dépouillement du spectre, on a fixé les positions des pics, C_i, où i = 1 à m, et on a utilisé une méthode des moindres carrés pour obtenir les hauteurs de pic initiales estimées, $H_i{}^C$, où i = 1 à m. On a ignoré les pics très petits ou négatifs. On a alors obtenu un nouveau nombre de ($H_i{}^C$, $C_i{}^C$) où i = 1 à un nouveau nombre m'. Nous avons observé que m' était toujours plus grand que le nombre de pics lissé final, M, ce qui satisfait l'exigence de la méthode d'itération de Newton-Raphson.

Dans l'exemple donné au tableau 1, on a supposé cinq pics correspondant aux canaux 194, 227, 269, 313 et 355 avec des hauteurs respectives de 2 043,9; 261,2; 172,8; 143,3 et 11,03. On s'est servi de ces valeurs et de l'équation 26 dans l'équation 4 pour construire le spectre simulé. On a ensuite considéré le spectre simulé comme données observées, $Y^O(N)$, pour la déconvolution. La première section du tableau 1 donne les paramètres supposés. Dans ce cas, la valeur de M est 5. Les résultats du dépouillement du spectre sont donnés dans la seconde section du tableau 2. On obtient ainsi une valeur de m' = 7, supérieure à M = 5.

Déconvolution de spectres DDP simulés

La présente section illustre la déconvolution de quelques spectres simulés. On s'est servi des positions et des hauteurs des pics indiquées aux tableaux 2 à 6 comme données d'entrée pour calculer les SDDP simulés à partir des équations 4 et 26. Les SDDP simulés ont ensuite été déconvolutés par les méthodes décrites ci-dessus.

Le tableau 1 donne les résultats des différentes étapes de l'itération suivis d'une comparaison des valeurs observées et calculées avec leurs différences obtenues dans la sixième itération.

Dans chaque itération, après la liste des écarts types de lissage, des valeurs de $H_i{}^C$ et $C_i{}^C$ sont indiquées sous la rubrique "Liste de corrections". Les nouveaux paramètres $C_i{}^C$ et $H_i{}^C$ obtenus respectivement à partir des équations 23 et 22 sont indiqués ensuite. Bien que les résultats de six itérations soient données, cinq itérations suffisaient pour obtenir un bon lissage.

Les tableaux 2 à 6 résument les résultats de quelques exemples. Pour le SDDP convoluté avec deux pics correspondant aux canaux 200 et 210, avec des hauteurs respectives de 1 500 et 500 évènements, il a fallu seulement trois itérations pour obtenir un résultat satisfaisant (tableau 2). Le tableau 3 montre qu'un spectre DDP consistant en une paire symétrique de distributions gaussiennes avec un espace centroïde de 10 canaux nécessite environ six itérations seulement. Trois spectres observés illustrés par des points aux figures 1 à 3

ont été reconstruits puis déconvolutés. Les résultats sont donnés aux tableaux 1 et 4 à 6. Tous convergent rapidement.

Déconvolution de spectres DDP observés

Plus de 200 SDDP d'écoulements biphases hydrogène-brai ont été enregistrés lors de mesures dans une colonne à bulles de 3,81 cm de diamètre intérieur, avec et sans écoulement liquide continu (11) et ont été déconvolutés avec succès à l'aide du programme mis au point.

Les figures 1 à 5 montrent diverses formes de SDDP (points). On a effectué une déconvolution afin d'obtenir les hauteurs et les positions des pics à l'aide de la méthode numérique décrite ci-dessus.

Les spectres déconvolutés sont représentés par les barres verticales. On s'est servi des positions des centres des pics et des hauteurs des pics résultant de la déconvolution pour calculer les spectres DDP représentés par les courbes continues afin de comparer avec les spectres observés. Dans tous les spectres, les données observées et les données calculées correspondent parfaitement.

DISCUSSION

Le problème considéré ressemble beaucoup à l'analyse de données sismiques ou de données de détection sonar ou radar. Dans ces analyses, on utilise les techniques de déconvolution pour interpréter les échos dus à un signal pulsé de forme peut-être inconnue transmis par des objets dont on ignore la position (19). Pour traiter ce problème, on utilise généralement des méthodes basées sur la technique de minimisation de Taylor (19) ou sur l'algorithme baysien (20-23). D'autres méthodes ont aussi été utilisées (24).

Quelle que soit la méthode, elle est similaire à la théorie décrite basée sur la formulation d'équations de récurrence. Initialement, la technique baysienne a été formulée à partir de la transformée de Fourier. Récemment, Kennett et coll. (20-23) l'ont formulée à partir de la transformée de Laplace. Le résultat de la transformation est un ensemble d'équations linéaires similaires aux équations 17 et 18. Elles peuvent être écrites sous forme récurrente pour être résolues sur un calculateur numérique. Pour cela, il faut disposer d'une grande mémoire et il faut pouvoir résoudre une grande matrice de valeurs propres. Par conséquent, pour les problèmes considérés, la méthode décrite ici est beaucoup plus efficace.

On utilise très souvent les déconvolutions de spectres en spectroscopie optique pour obtenir les paramètres relatifs aux électrons, à la vibration et à la rotation comme dans la méthode appelée *analyse de contour de spectre* (25). L'analyse de spectres ESCA et Mössbauer ainsi que celle d'autres spectres nucléaires sont aussi identiques à l'analyse de contour de spectres optiques. Dans ces domaines, le spectre est convoluté par pics avec les centres caractérisés par des formules bien connues contenant des paramètres et des nombres quantiques (14,26). La méthode de déconvolution décrite ici peut s'appliquer facilement à ces domaines.

Enfin, le fait de négliger le terme N(u) correspondant au bruit aléatoire dans l'équation 1 peut souvent être justifié par la technique expérimentale. Par exemple, comme on l'a vu dans un rapport précédent, on peut supprimer suffisamment le bruit dans la méthode d'interrogation aux rayons gamma en utilisant un faisceau étroit (10).

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie sincèrement D.J. Patmore et W.H. Dawson des Laboratoires de recherche sur l'énergie du CANMET ainsi que J.J. Lipsett de EACL-LNCR pour l'intérêt et l'encouragement dont ils ont témoigné tout au long du présent travail.

L'auteur remercie aussi chaleureusement Esther, son épouse, qui s'est chargée d'une grande partie de l'étude de la documentation, ainsi que Nita Harcourt qui a édité le texte anglais.

RÉFÉRENCES

1. Shah, Y.T. "Bubble column: An overview"; *ACS Symp Ser* 168:203; 1981.
2. Shah, Y.T. *Gas-liquid-solid reactor design*; NY; McGraw-Hill; 1979.
3. Moo-Young, M. "Three phase reactors: Application to biological reactors"; Chapter 14 of the Lecture Notes for a course on three phase reactors given at Waterloo University; Sept. 27-Oct. 1, 1982.
4. McCabe, W.L. et Smith, J.C. *Unit Operations of Chemical Engineering*; 3rd ed.; NY; McGraw-Hill; 1976.
5. Charpentier, J.C. "Mass transfer rate in gas-liquid absorbers and reactors"; *Adv Chem Eng* 11:1; 1981.
6. Liu, D.D.S.; MacFarlane, R.; et Saltvolt, J.R. "Development of instrument for combustion studies: Part 1 — Tests of ionization probes for CTF applications"; Atomic Energy of Canada Limited; *Rapport* WNRE-512-1; 1981.
7. Liu, D.D.S. et MacFarlane, R. "Studies in hydrogen combustion using open burners: Part 1 — A Laser-Doppler anemometer and its application to burner velocity distribution measurements"; Atomic Energy of Canada Limited; *Rapport* WNRE-476-1; 1980.
8. Danel, F. et Delhaye, J.M. "Sonde optique pour mesure du taux de présence local en écoulement diphasique"; Mesures-Régulation-Atomatisé 99-101; août-sept. 1971.
9. Hsu, Y.Y.; Simon, F.F. et Graham, R.W. "Application of hot-wire anemometry for two-phase flow measurements such as void fraction and slip-velocity"; Multiple Phase Flow Symp.; Lipstein, N.J.; ed.; *ASEM*: 26-34; 1963.
10. Liu, D.D.S.; Lipsett, J.J.; et Noble, R.D. "Development of gamma-ray interrogation techniques for multi-phase flow hydrodynamic studies: Part 1 — Principle and feasibility tests"; (En prép.).
11. Liu, D.D.S. et Lipsett, J.J. Private communication.
12. Irving, J. et Mullineux, N. *Mathematics in physics and engineering*; NY; Academic Press; 1959.
13. Bracewell, R. *The Fourier Transform and its Applications*; NY; McGraw-Hill; 1965.
14. Evans, R.D. *The Atomic Nucleus*; NY; McGraw-Hill; 1955.
15. Ralston, A. *A First Course in Numerical Analysis*; NY; McGraw-Hill; 1965.
16. Carnahan, B.; Luther, H.A.; et Wilkes, J.O. *Applied Numerical Methods*; NY; John Wiley; 1969.
17. Hamming, R.W. *Numerical Methods for Scientists and Engineers*; NY; McGraw-Hill; 1962.
18. Price, W.J. *Nuclear Radiation Detection*; NY; McGraw-Hill; 1958.
19. Delves, L.M. et Samba, A. "Deconvolution of seismic data"; *Computer Phys Commun* 26:473; 1982.
20. Kennett, T.J.; Prestwich, W.V.; et Robertson, A. "Baysian deconvolution I: Convergent properties"; *Nucl Instr Methods* 151:285; 1978.
21. Kennett, T.J.; Prestwich, W.V.; et Robertson, A. "Baysian deconvolution II: Noise properties"; *Nucl Instr Methods* 151:293; 1978.
22. Kennett, T.J.; Prestwich, W.V.; et Robertson, A. "Baysian deconvolution III: Applications and algorithm implementation"; *Nucl Instr Methods* 153:125; 1978.
23. Kennett, T.J. et Prestwich, W.V. "On the deconvolution of exponential response functions"; *Phys Med Biol* 24:1107; 1979.
24. Doroshenko, J.J.; Kraitor, S.N.; Kurznetsova, T.V.; Kushnereva, K.K.; et Leonov, E.S. *Nucl Tech* 23:296; 1977.
25. Brand, J.C.D.; Liu, D.D.S.; Chan, H.W.; Callomon, J.H.; et Watson, J.K.G. "The 3820 Å system of propynal: Rotational analysis of the O-O band"; *J Mol Spectry* 50:304; 1974.
26. Herzberg, G. "Molecular spectra and molecular structure, III. Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules"; Princeton, N.J.; Van Nostrand; 1967.

TABLEAUX

Tableau 1 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 1

```
   LISTE DES DONNÉES D'ENTRÉE

   I=  1  CENTRE =  194     HAUTEUR =  2043.9
   I=  2  CENTRE =  227     HAUTEUR =   261.2
   I=  3  CENTRE =  269     HAUTEUR =   172.8
   I=  4  CENTRE =  313     HAUTEUR =   143.3
   I=  5  CENTRE =  355     HAUTEUR =   110.3


DONNÉES D'ENTRÉE POUR LES MOINDRES CARRÉS:  RÉSULTATS DU DÉPOUILLEMENT

I= 1 CENTRE(I) = 195.0     PIC(I) =  2110.796
I= 2 CENTRE(I) = 241.0     PIC(I) =   213.207
I= 3 CENTRE(I) = 309.0     PIC(I) =   143.606
I= 4 CENTRE(I) = 353.0     PIC(I) =   124.110
I= 5 CENTRE(I) = 275.0     PIC(I) =   113.309
I= 6 CENTRE(I) = 223.0     PIC(I) =    28.442
I= 7 CENTRE(I) = 381.0     PIC(I) =     3.869


    ITÉRATION N° = 0


ÉCART TYPE = 12.71

I= 1 CENTRE(I) = 195.0     PIC(I) =  2110.796
I= 2 CENTRE(I) = 241.0     PIC(I) =   213.207
I= 3 CENTRE(I) = 309.0     PIC(I) =   143.606
I= 4 CENTRE(I) = 353.0     PIC(I) =   124.110
I= 5 CENTRE(I) = 275.0     PIC(I) =   113.309
I= 6 CENTRE(I) = 223.0     PIC(I) =    28.442
I= 7 CENTRE(I) = 381.0     PIC(I) =     3.869


LISTE DES CORRECTIONS

      1 delta-Hauteur = -.7479E+02  delta-Centre = -.1022E+01
      2 delta-Hauteur = -.1776E+03  delta-Centre =  .8925E+00
      3 delta-Hauteur = -.3078E+01  delta-Centre =  .3956E+01
      4 delta-Hauteur = -.1443E+02  delta-Centre =  .1164E+01
      5 delta-Hauteur =  .4543E+02  delta-Centre = -.6555E+01
      6 delta-Hauteur =  .2194E+03  delta-Centre =  .2128E+02
      7 delta-Hauteur = -.1312E+01  delta-Centre = -.6837E+01
```

Tableau 1 (suite)

```
   ITÉRATION N° = 1

ÉCART TYPE = 35.26

I= 1 CENTRE(I) = 194.0     PIC(I) =  2036.002
I= 2 CENTRE(I) = 241.9     PIC(I) =    35.613
I= 3 CENTRE(I) = 313.0     PIC(I) =   140.528
I= 4 CENTRE(I) = 354.2     PIC(I) =   109.676
I= 5 CENTRE(I) = 268.4     PIC(I) =   158.740
I= 6 CENTRE(I) = 233.0     PIC(I) =   247.839
I= 7 CENTRE(I) = 374.2     PIC(I) =     2.557

LISTE DES CORRECTIONS

       1 delta-Hauteur =  .1034E+02  delta-Centre =  .9690E+00
       2 delta-Hauteur = -.1573E+03  delta-Centre =  .7694E+02
       3 delta-Hauteur =  .1329E+01  delta-Centre =  .1905E+01
       4 delta-Hauteur =  .5731E+01  delta-Centre =  .2278E+01
       5 delta-Hauteur = -.3166E+02  delta-Centre =  .4990E+01
       6 delta-Hauteur =  .1920E+03  delta-Centre = -.8214E+01
       7 delta-Hauteur = -.1030E+02  delta-Centre =  .2526E+02

   ITÉRATION N° = 2

ÉCART TYPE = 57.55

I= 1 CENTRE(I) = 194.9     PIC(I) =  2046.347
I= 2 CENTRE(I) = 314.9     PIC(I) =   141.857
I= 3 CENTRE(I) = 356.4     PIC(I) =   115.408
I= 4 CENTRE(I) = 273.4     PIC(I) =   127.085
I= 5 CENTRE(I) = 224.8     PIC(I) =   439.851

LISTE DES CORRECTIONS

       1 delta-Hauteur =  .9845E+01  delta-Centre =  .7913E-01
       2 delta-Hauteur =  .3688E+01  delta-Centre = -.1516E+01
       3 delta-Hauteur = -.4294E+01  delta-Centre = -.1023E+01
       4 delta-Hauteur =  .4027E+02  delta-Centre = -.5793E+01
       5 delta-Hauteur = -.1859E+03  delta-Centre =  .2454E+01
```

Tableau 1 (suite)

```
   ITÉRATION N° = 3


ÉCART TYPE = 23.84

I= 1 CENTRE(I) = 195.0     PIC(I) =  2056.192
I= 2 CENTRE(I) = 313.3     PIC(I) =   145.545
I= 3 CENTRE(I) = 355.4     PIC(I) =   111.114
I= 4 CENTRE(I) = 267.6     PIC(I) =   167.350
I= 5 CENTRE(I) = 227.2     PIC(I) =   253.958


LISTE DES CORRECTIONS

      1 delta-Hauteur = -.2172E+02  delta-Centre = -.1056E+01
      2 delta-Hauteur = -.2019E+01  delta-Centre = -.7133E-01
      3 delta-Hauteur = -.6107E+00  delta-Centre = -.2761E-01
      4 delta-Hauteur =  .6264E+01  delta-Centre =  .1846E+01
      5 delta-Hauteur =  .1754E+02  delta-Centre = -.6968E+00


   ITÉRATION N° = 4


ÉCART TYPE = 21.46

I= 1 CENTRE(I) = 194.0     PIC(I) =  2034.476
I= 2 CENTRE(I) = 313.3     PIC(I) =   143.526
I= 3 CENTRE(I) = 355.4     PIC(I) =   110.503
I= 4 CENTRE(I) = 269.5     PIC(I) =   173.615
I= 5 CENTRE(I) = 226.5     PIC(I) =   271.502


LISTE DES CORRECTIONS

      1 delta-Hauteur =  .1132E+02  delta-Centre =  .9720E+00
      2 delta-Hauteur =  .1712E-01  delta-Centre = -.1111E+00
      3 delta-Hauteur =  .5857E-01  delta-Centre = -.4421E-01
      4 delta-Hauteur = -.4311E+00  delta-Centre = -.1702E+00
      5 delta-Hauteur = -.1075E+02  delta-Centre =  .8260E+00
```

Tableau 1 (suite)

```
    ITÉRATION N° = 5


ÉCART TYPE = .72

I= 1 CENTRE(I) = 194.9     PIC(I) =  2045.792
I= 2 CENTRE(I) = 313.2     PIC(I) =   143.544
I= 3 CENTRE(I) = 355.3     PIC(I) =   110.562
I= 4 CENTRE(I) = 269.3     PIC(I) =   173.183
I= 5 CENTRE(I) = 227.4     PIC(I) =   260.751


LISTE DES CORRECTIONS


       1 delta-Hauteur = -.8596E+00  delta-Centre =  .1453E-01
       2 delta-Hauteur = -.3724E+00  delta-Centre =  .3662E-01
       3 delta-Hauteur = -.2921E+00  delta-Centre =  .1242E-01
       4 delta-Hauteur = -.6223E+00  delta-Centre =  .7155E-01
       5 delta-Hauteur = -.7615E+00  delta-Centre =  .1290E+00

CECI EST L'ITÉRATION = 6

ÉCART TYPE = .43

I= 1 CENTRE(I) = 195.0     PIC(I) =  2044.932
I= 2 CENTRE(I) = 313.2     PIC(I) =   143.171
I= 3 CENTRE(I) = 355.4     PIC(I) =   110.270
I= 4 CENTRE(I) = 269.4     PIC(I) =   172.561
I= 5 CENTRE(I) = 227.5     PIC(I) =   259.989


LISTE DES CORRECTIONS

       1 delta-Hauteur = -.3423E-02  delta-Centre =  .1459E-01
       2 delta-Hauteur = -.1329E-01  delta-Centre =  .3754E-01
       3 delta-Hauteur = -.9865E-02  delta-Centre =  .1191E-01
       4 delta-Hauteur = -.1732E-01  delta-Centre =  .7250E-01
       5 delta-Hauteur = -.2517E-01  delta-Centre =  .1299E+00
```

Tableau 1 (suite)

ITÉRATION N° = 7 (Résultats de la sixième itération)

CANAL	OBS	CALC	O-C
109	.15	.15	.00
110	.18	.19	.00
111	.23	.23	.00
112	.29	.29	.00
113	.35	.36	.00
114	.44	.44	.00
115	.54	.54	.00
116	.67	.67	.00
117	.82	.82	-.01
118	1.00	1.01	-.01
119	1.22	1.23	-.01
120	1.48	1.49	-.01
121	1.80	1.81	-.01
122	2.18	2.19	-.01
123	2.64	2.65	-.01
124	3.18	3.19	-.02
125	3.81	3.83	-.02
126	4.57	4.59	-.02
127	5.46	5.49	-.03
128	6.51	6.54	-.03
129	7.74	7.78	-.04
130	9.18	9.22	-.04
131	10.85	10.90	-.05
132	12.80	12.85	-.05
133	15.05	15.12	-.06
134	17.66	17.73	-.07
135	20.66	20.74	-.08
136	24.11	24.21	-.09
137	28.07	28.17	-.10
138	32.58	32.70	-.12
139	37.73	37.86	-.13
140	43.56	43.71	-.15
141	50.17	50.34	-.16
142	57.63	57.82	-.18
143	66.03	66.23	-.20
144	75.45	75.67	-.22
145	85.98	86.23	-.25
146	97.73	98.00	-.27
147	110.79	111.09	-.30
148	125.27	125.59	-.32
149	141.26	141.61	-.35
150	158.88	159.26	-.38

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
151	178.22	178.64	-.42
152	199.40	199.84	-.45
153	222.50	222.98	-.48
154	247.63	248.14	-.52
155	274.87	275.42	-.55
156	304.30	304.89	-.59
157	336.00	336.63	-.62
158	370.03	370.69	-.66
159	406.44	407.14	-.70
160	445.25	445.99	-.73
161	486.50	487.27	-.77
162	530.17	530.97	-.80
163	576.25	577.08	-.84
164	624.68	625.55	-.87
165	675.42	676.32	-.90
166	728.37	729.30	-.93
167	783.41	784.37	-.96
168	840.41	841.40	-.98
169	899.21	900.21	-1.01
170	959.60	960.63	-1.03
171	1021.38	1022.43	-1.04
172	1084.31	1085.37	-1.06
173	1148.12	1149.19	-1.07
174	1212.53	1213.61	-1.08
175	1277.22	1278.31	-1.09
176	1341.88	1342.97	-1.09
177	1406.17	1407.26	-1.09
178	1469.72	1470.81	-1.09
179	1532.19	1533.27	-1.08
180	1593.20	1594.27	-1.07
181	1652.38	1653.45	-1.06
182	1709.38	1710.43	-1.05
183	1763.81	1764.85	-1.04
184	1815.34	1816.36	-1.02
185	1863.63	1864.63	-1.00
186	1908.35	1909.33	-.98
187	1949.21	1950.17	-.96
188	1985.94	1986.88	-.94
189	2018.30	2019.22	-.92
190	2046.07	2046.96	-.89
191	2069.08	2069.95	-.87
192	2087.18	2088.03	-.85
193	2100.29	2101.11	-.82
194	2108.32	2109.12	-.79
195	2111.27	2112.04	-.77

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
196	2109.15	2109.89	-.74
197	2102.01	2102.73	-.72
198	2089.96	2090.65	-.69
199	2073.13	2073.79	-.66
200	2051.69	2052.32	-.63
201	2025.83	2026.43	-.60
202	1995.80	1996.37	-.57
203	1961.85	1962.39	-.54
204	1924.26	1924.76	-.50
205	1883.34	1883.81	-.47
206	1839.40	1839.83	-.43
207	1792.77	1793.17	-.39
208	1743.80	1744.15	-.36
209	1692.82	1693.14	-.31
210	1640.18	1640.45	-.27
211	1586.21	1586.44	-.23
212	1531.26	1531.44	-.18
213	1475.63	1475.77	-.14
214	1419.64	1419.73	-.09
215	1363.60	1363.63	-.04
216	1307.76	1307.75	.01
217	1252.39	1252.33	.06
218	1197.74	1197.62	.11
219	1144.00	1143.84	.16
220	1091.39	1091.17	.21
221	1040.06	1039.79	.26
222	990.17	989.85	.31
223	941.84	941.48	.36
224	895.18	894.77	.41
225	850.27	849.82	.45
226	807.18	806.69	.49
227	765.95	765.42	.53
228	726.61	726.04	.57
229	689.18	688.58	.60
230	653.66	653.02	.64
231	620.03	619.36	.66
232	588.26	587.58	.69
233	558.34	557.63	.71
234	530.21	529.48	.73
235	503.82	503.08	.74
236	479.13	478.38	.75
237	456.08	455.32	.76
238	434.60	433.84	.77
239	414.64	413.87	.77
240	396.12	395.35	.77

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
241	378.99	378.22	.77
242	363.17	362.41	.76
243	348.60	347.85	.75
244	335.22	334.47	.75
245	322.95	322.22	.73
246	311.74	311.01	.72
247	301.51	300.80	.71
248	292.22	291.52	.69
249	283.79	283.11	.68
250	276.16	275.50	.66
251	269.28	268.64	.65
252	263.09	262.46	.63
253	257.54	256.92	.61
254	252.56	251.96	.60
255	248.10	247.52	.58
256	244.11	243.54	.57
257	240.54	239.99	.55
258	237.34	236.81	.54
259	234.47	233.94	.52
260	231.87	231.36	.51
261	229.51	229.01	.49
262	227.34	226.86	.48
263	225.33	224.87	.47
264	223.45	222.99	.46
265	221.66	221.21	.44
266	219.93	219.49	.43
267	218.23	217.81	.42
268	216.56	216.15	.41
269	214.88	214.48	.40
270	213.19	212.80	.39
271	211.46	211.08	.38
272	209.70	209.33	.37
273	207.90	207.54	.36
274	206.06	205.71	.35
275	204.18	203.84	.34
276	202.26	201.93	.33
277	200.31	199.99	.32
278	198.34	198.03	.31
279	196.36	196.06	.30
280	194.39	194.09	.30
281	192.42	192.14	.29
282	190.49	190.21	.28
283	188.60	188.33	.27
284	186.77	186.51	.26
285	185.01	184.76	.25

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
286	183.34	183.10	.25
287	181.77	181.53	.24
288	180.30	180.07	.23
289	178.95	178.73	.22
290	177.72	177.51	.22
291	176.63	176.42	.21
292	175.66	175.46	.20
293	174.84	174.64	.20
294	174.14	173.95	.19
295	173.57	173.38	.19
296	173.13	172.95	.19
297	172.81	172.63	.18
298	172.59	172.41	.18
299	172.46	172.29	.17
300	172.42	172.25	.17
301	172.45	172.28	.17
302	172.54	172.37	.17
303	172.66	172.49	.16
304	172.80	172.64	.16
305	172.96	172.80	.16
306	173.10	172.94	.16
307	173.22	173.06	.16
308	173.30	173.15	.16
309	173.33	173.18	.15
310	173.30	173.15	.15
311	173.20	173.04	.15
312	173.01	172.86	.15
313	172.73	172.58	.15
314	172.36	172.21	.15
315	171.88	171.74	.15
316	171.31	171.17	.14
317	170.64	170.50	.14
318	169.88	169.74	.14
319	169.02	168.88	.14
320	168.07	167.94	.14
321	167.05	166.91	.13
322	165.95	165.82	.13
323	164.79	164.66	.13
324	163.58	163.45	.13
325	162.32	162.20	.13
326	161.04	160.91	.12
327	159.73	159.61	.12
328	158.42	158.30	.12
329	157.10	156.99	.12
330	155.80	155.69	.12

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
331	154.52	154.40	.11
332	153.26	153.14	.11
333	152.03	151.92	.11
334	150.84	150.73	.11
335	149.68	149.58	.11
336	148.57	148.47	.11
337	147.50	147.40	.10
338	146.47	146.37	.10
339	145.47	145.37	.10
340	144.51	144.41	.10
341	143.57	143.47	.10
342	142.64	142.54	.10
343	141.73	141.63	.10
344	140.81	140.71	.10
345	139.88	139.78	.10
346	138.92	138.83	.10
347	137.93	137.84	.10
348	136.90	136.80	.10
349	135.80	135.70	.10
350	134.63	134.54	.09
351	133.38	133.29	.09
352	132.04	131.95	.09
353	130.60	130.51	.09
354	129.05	128.96	.09
355	127.38	127.29	.09
356	125.59	125.50	.09
357	123.67	123.58	.09
358	121.61	121.53	.09
359	119.43	119.34	.08
360	117.11	117.03	.08
361	114.66	114.58	.08
362	112.08	112.00	.08
363	109.37	109.30	.08
364	106.55	106.48	.07
365	103.61	103.54	.07
366	100.58	100.51	.07
367	97.45	97.38	.06
368	94.24	94.17	.06
369	90.95	90.89	.06
370	87.61	87.55	.06
371	84.22	84.16	.05
372	80.79	80.74	.05
373	77.35	77.30	.05
374	73.89	73.85	.04
375	70.44	70.40	.04

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
376	67.01	66.97	.04
377	63.61	63.57	.04
378	60.25	60.21	.03
379	56.94	56.91	.03
380	53.69	53.66	.03
381	50.52	50.49	.03
382	47.43	47.41	.02
383	44.43	44.41	.02
384	41.52	41.50	.02
385	38.72	38.70	.02
386	36.02	36.01	.02
387	33.44	33.43	.01
388	30.97	30.96	.01
389	28.62	28.61	.01
390	26.38	26.38	.01
391	24.27	24.26	.01
392	22.27	22.26	.01
393	20.39	20.39	.01
394	18.63	18.62	.00
395	16.98	16.97	.00
396	15.43	15.43	.00
397	14.00	14.00	.00
398	12.67	12.67	.00
399	11.44	11.44	.00
400	10.31	10.31	.00
401	9.26	9.26	.00
402	8.31	8.31	.00
403	7.43	7.43	.00
404	6.63	6.63	.00
405	5.91	5.91	.00
406	5.25	5.25	.00
407	4.65	4.65	.00
408	4.11	4.11	.00
409	3.63	3.63	.00
410	3.19	3.19	.00
411	2.80	2.80	.00
412	2.45	2.46	.00
413	2.15	2.15	.00
414	1.87	1.87	.00
415	1.63	1.63	.00
416	1.41	1.41	.00
417	1.22	1.22	.00
418	1.06	1.06	.00
419	.91	.91	.00
420	.78	.78	.00

Tableau 1 (suite)

CANAL	OBS	CALC	O-C
421	.67	.67	.00
422	.57	.57	.00
423	.49	.49	.00
424	.42	.42	.00
425	.35	.35	.00
426	.30	.30	.00
427	.25	.25	.00
428	.21	.21	.00
429	.18	.18	.00
430	.15	.15	.00
431	.13	.13	.00
432	.11	.11	.00
433	.09	.09	.00
434	.07	.07	.00
435	.06	.06	.00
436	.05	.05	.00
437	.04	.04	.00
438	.03	.03	.00

ÉCART TYPE = .44

RÉSULTATS FINAUX

I= 1 CENTRE(I) = 195.0 PIC(I) = 2044.929
I= 2 CENTRE(I) = 313.2 PIC(I) = 143.158
I= 3 CENTRE(I) = 355.4 PIC(I) = 110.260
I= 4 CENTRE(I) = 269.5 PIC(I) = 172.544
I= 5 CENTRE(I) = 227.6 PIC(I) = 259.964

Tableau 2 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 1

Pic	1		2		3		4		5		RMS Écart Type
	Canal	Pic	Canal	Pic	Canal	Pic	Canal	Pic	Canal	Pic	
Données d'entrée	194.0	2043.9	227.0	261.2	269.0	172.8	313.0	143.3	355.0	110.3	
Après dépouillement du spectre	195.0	2110.8	241.0 223.0	213.2 28.4	275.0	113.3	309.0	143.6	353.0 381.0	124.1 3.9	12.71
Après 1ère itération	194.0	2036.0	241.9 233.0	35.6 247.8	268.4	158.7	313.0	140.5	354.2 374.2	109.7 2.6	35.26
Après 2e itération	194.9	2046.3	224.8	439.9	273.4	127.1	314.9	141.9	356.4	115.4	57.55
Après 3e itération	195.0	2056.2	227.2	254.0	267.6	167.4	313.3	145.5	355.4	111.1	23.84
Après 4e itération	194.0	2034.5	226.5	271.5	269.5	173.6	313.3	143.5	355.4	110.5	21.46
Après 5e itération	194.9	2045.8	227.4	260.8	269.3	173.2	313.2	143.5	355.4	110.6	0.72
Après 6e itération	195.0	2044.9	227.5	260.0	269.3	172.6	313.2	143.17	355.4	110.3	0.43

Tableau 3 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 2

Pic	1		2		RMS Écart type
	Canal	Pic	Canal	Pic	
Données d'entrée	200.0	1500.0	210.0	500.0	
Après dépouillement du spectre	202.0	1943.5	230.0	53.9	6.85
Après 1ère itération	201.4	1882.0	220.0	113.8	17.11
Après 2e itération	201.2	1742.4	210.0	258.6	13.54
Après 3e itération	200.3	1508.6	211.3	497.0	6.91
Après 4e itération	200.4	1538.2	210.8	461.7	5.91
Après 5e itération	200.4	1486.5	210.6	513.0	2.05
Après 6e itération	200.4	1508.8	210.6	490.9	1.38
Après 7e itération	200.4	1500.1	210.6	499.5	0.13

Tableau 4 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 3

Pic	1		2		RMS Écart type
	Canal	Pic	Canal	Pic	
Données d'entrée	200.0	1500.0	210.0	1500.0	
Après dépouillement du spectre	204.0	2855.3	231.0	151.7	16.56
Après 1ère itération	203.5	2725.9	221.0	264.2	30.12
Après 2e itération	202.7	2318.1	211.0	685.0	47.25
Après 3e itération	201.0	1854.5	209.8	1055.8	58.54
Après 4e itération	200.5	1622.2	211.6	1378.8	7.16
Après 5e itération	200.7	1553.9	210.8	1444.7	8.34
Après 6e itération	200.6	1478.8	210.7	1520.2	3.17
Après 7e itération	200.7	1510.0	210.7	1489.3	1.60
Après 8e itération	200.7	1497.7	210.7	1501.6	0.40

Tableau 5 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 4

Pic	1		2		3		4		RMS
	Canal	Pic	Canal	Pic	Canal	Pic	Canal	Pic	Écart Type
Données d'entrée	189.0	1523.9	219.0	781.6	255.0	335.6	289.0	73.4	
Après dépouillement du spectre	195.0	1858.3	236.0	598.3	274.0	189.5	311.0	11.3	55.69
Après 1ère itération	190.7	1643.1	226.0	605.6	264.0	316.2	301.0	119.7	70.18
Après 2e itération	190.1	1568.1	218.6	742.8	255.2	323.2	294.6	75.2	27.21
Après 3e itération	189.1	1516.0	219.5	793.7	255.6	337.4	291.3	68.0	4.32
Après 4e itération	189.1	1524.8	219.6	781.4	255.7	355.9	289.4	72.2	0.50
Après 5e itération	189.1	1523.8	219.6	781.6	255.7	335.5	289.4	73.3	0.03
Après 6e itération	189.1	1523.8	219.6	781.6	255.7	355.5	289.4	73.4	0.04

Tableau 6 — Résultats des itérations pour la déconvolution du SDDP — Exemple 5

Pic	1		2		RMS
	Canal	Pic	Canal	Pic	Écart Type
Données d'entrée	171.0	2753.0	203.0	27.6	
Après dépouillement du spectre	171.0	2754.7	205.0	26.9	0.63
Après 1ère itération	171.0	2753.2	203.1	27.4	0.09
Après 2e itération	171.0	2753.0	203.1	27.6	0.00
Après 3e itération	171.0	2753.0	203.1	27.6	0.00

FIGURES

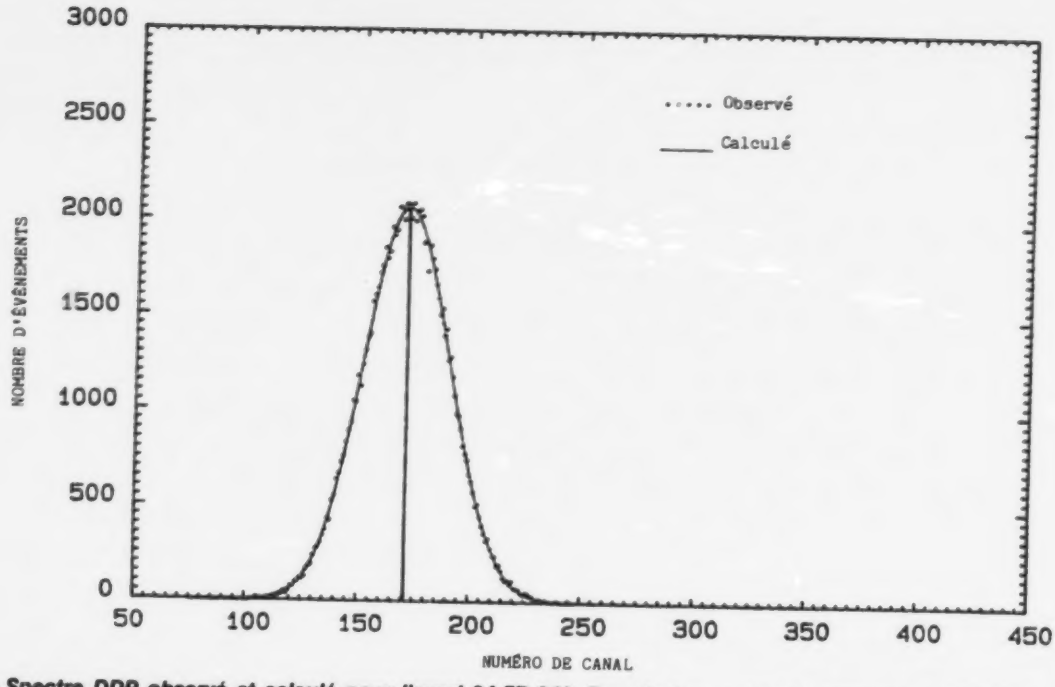

Fig. 1 – Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-946. Température = 200°C, pression = 2,76 MPa, vitesse superficielle du gaz = 0,00 cm/s

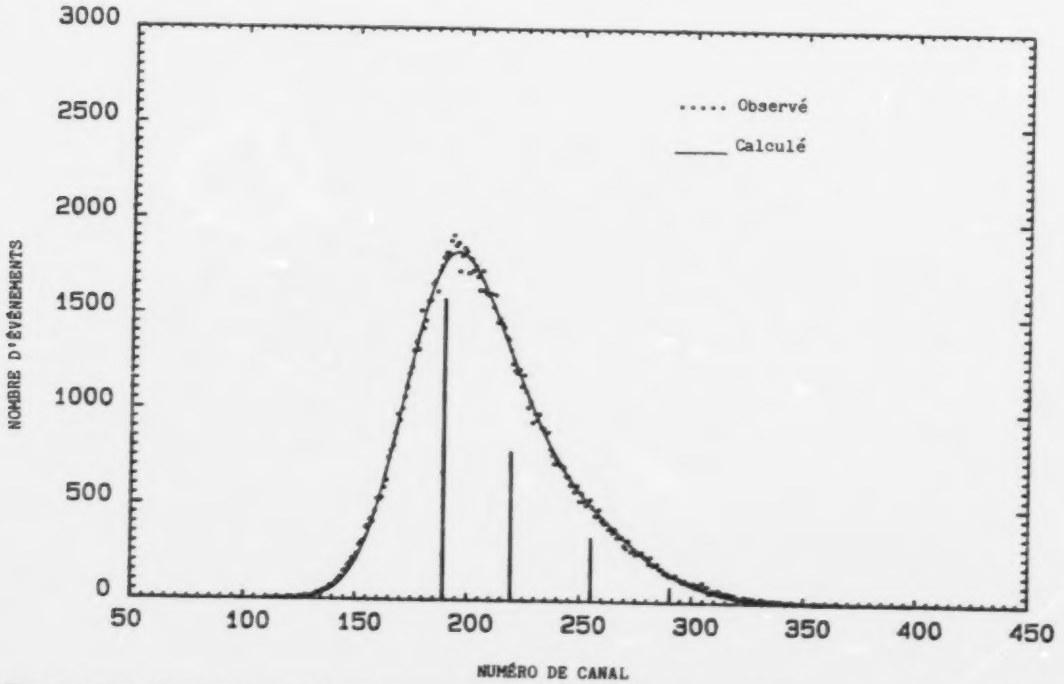

Fig. 2 – Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-615. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 1,77 cm/s

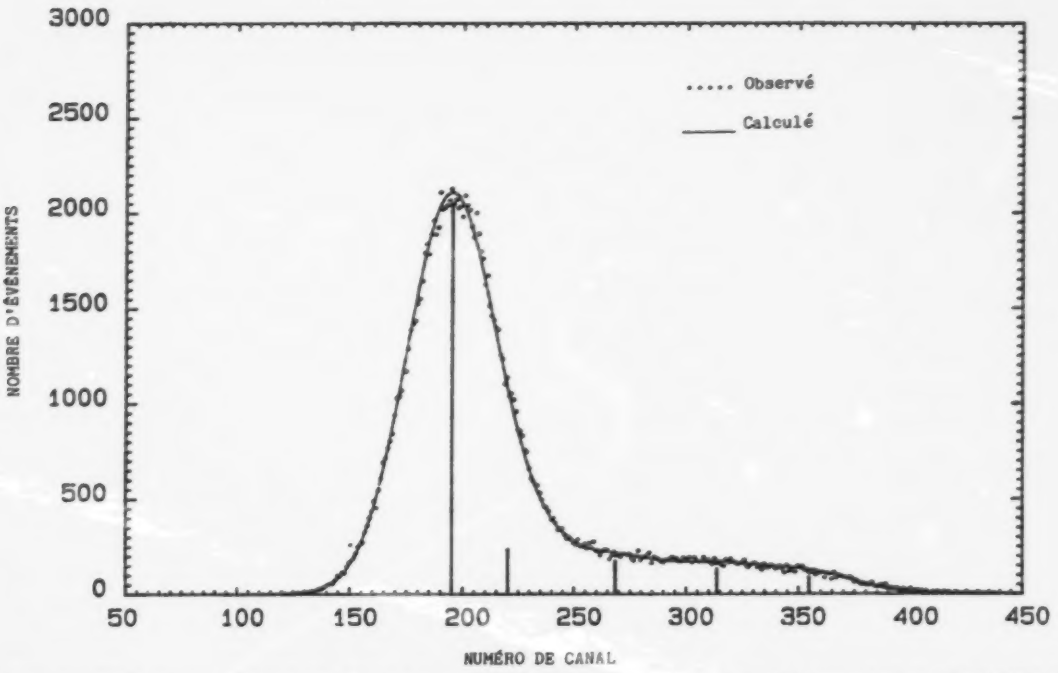

Fig. 3 – Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-657. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 1,31 cm/s

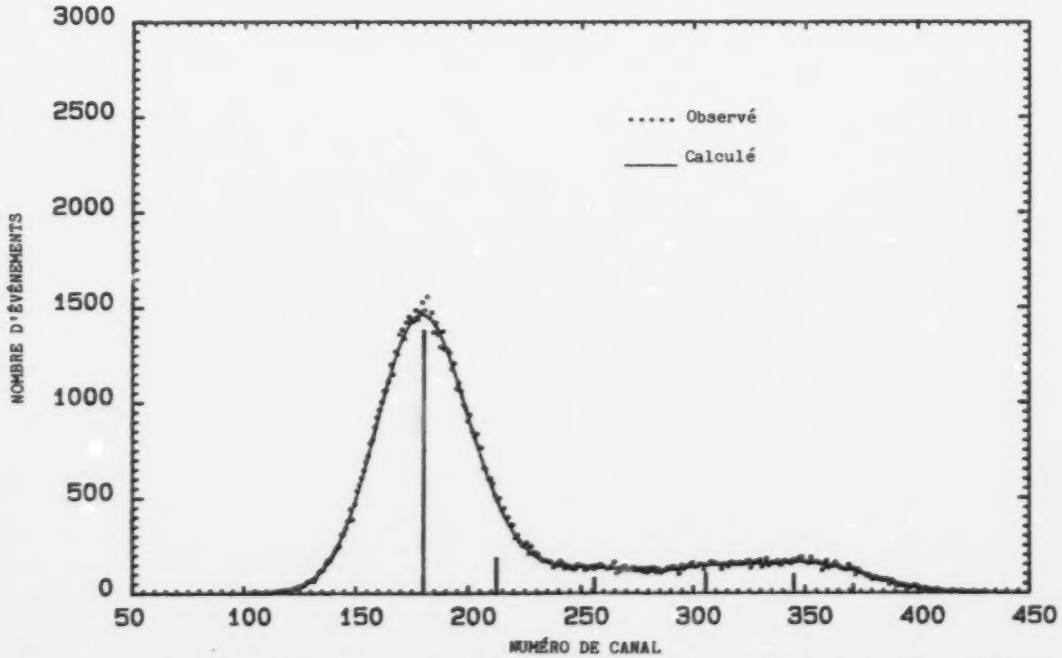

Fig. 4 – Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-990. Température = 200°C, pression = 2,76 MPa, vitesse superficielle du gaz = 2,38 cm/s

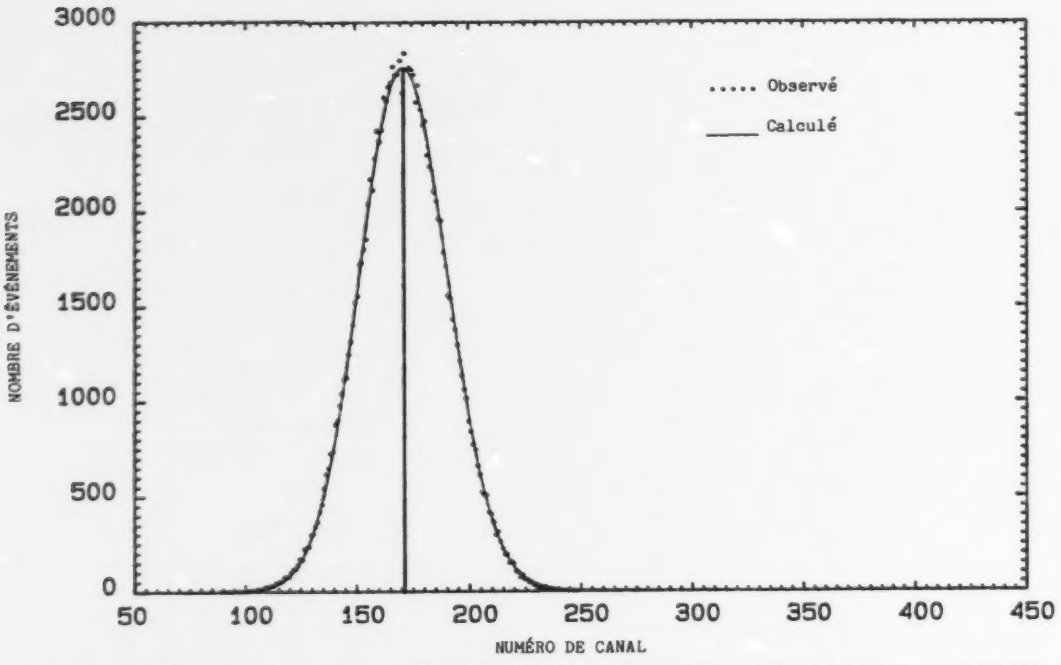

Fig. 5 – Spectre DDP observé et calculé pour l'essai 84-FD-681. Température = 200°C, pression = 13,79 MPa, vitesse superficielle du gaz = 0,53 cm/s